ISSN 1346-7328
国総研資料 第 537 号
平成 21 年 10 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 537 October 2009

市街地特性及び浸水予測結果を考慮した津波避難安全性評価の基礎的研究

熊谷兼太郎・鈴木武

Fundamental Study of Evaluating the Safeness of Tsunami Evacuation in consideration of Characteristics of Urban Structure and Tsunami Inundation

Kentaro KUMAGAI,Takeshi SUZUKI

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No. 537　　2009年10月
(YSK-N-187)

市街地特性及び浸水予測結果を考慮した津波避難安全性評価の基礎的研究

熊谷兼太郎*・鈴木武**

要　旨

津波避難に係るリスクには，地震動による建物倒壊で避難経路が閉塞するリスク，津波浸水で避難が不可能になるリスク等がある．津波避難の安全性を検証するためには，こうしたリスクを的確に評価する必要がある．そこで，建物倒壊で避難経路が閉塞するリスクを考慮した避難所要時間と浸水開始時間とを比較する津波避難安全性の評価手法を構築するとともに，沿岸地区の市街地特性の現地調査を行い，構築した手法を用いて津波避難安全性の検討を行った．

これにより，以下の結果を得た．

(1) 建物倒壊で避難経路が閉塞し迂回する現象を考慮した，津波避難安全性の評価手法を対象地区に適用することができた．

(2) 対象地区の街路の閉塞箇所数，影響を受ける建物数，避難距離の増加量等の予測結果を得た．

キーワード：津波避難，建物倒壊，避難距離，津波浸水

*沿岸海洋研究部主任研究官
**沿岸海洋研究部沿岸防災研究室長
〒239-0826　神奈川県横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5024　Fax：046-844-5068　　e-mail: kumagai-k27n@ysk.nilim.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 537 October 2009
(YSK-N-187)

Fundamental Study of Evaluating the Safeness of Tsunami Evacuation in consideration of Characteristics of Urban Structure and Tsunami Inundation

Kentaro KUMAGAI*
Takeshi SUZUKI**

Synopsis

There are risks of tsunami evacuation for residents, such as risk of encountering obstacles in his/her evacuation caused by collapsed buildings and its wreckage, risk of being stranded in tsunami inundation and the other risks. To verify the safeness of tsunami evacuation, it is important to analyze and evaluate these risks on tsunami evacuation. In this technical note, a comparison method between amount of time required for evacuation and lead time for tsunami inundation is developed for evaluating the safeness of tsunami evacuation, in consideration of the characteristics of the urban structure and results of tsunami numerical simulation. A field survey of the characteristics of a coastal area of a city was conducted and the safeness of tsunami evacuation of the area was evaluated.

The results are

1) A method of evaluating the safeness of tsunami evacuation is developed, which includes an effect of the risk of encountering obstacles in the evacuation caused by collapsed buildings and its wreckage.

2) Some case-studies of tsunami evacuation are conducted and the useful data for verification of the safeness of tsunami evacuation are extracted from the case-studies.

Key Words: tsunami evacuation, building collapse, evacuation distance, tsunami inundation

* Senior Researcher of Marine and Coastal Department
** Head of Coastal Disaster Prevention Division, Marine and Coastal Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, Kanagawa, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5024 Fax : +81-46-844-5068 e-mail: kumagai-k27n@ysk.nilim.go.jp

目　次

1. 緒論 ····· 1

2. 市街地特性の現地調査 ····· 1
2.1 対象とした地区 ····· 1
2.2 調査項目及び調査手法 ····· 1
2.3 調査結果 ····· 3

3. 浸水予測計算 ····· 4
3.1 計算手法 ····· 4
3.2 計算結果 ····· 4

4. 津波避難安全性の評価手法及び事例 ····· 5
4.1 避難距離の解析（建物倒壊なしの場合） ····· 5
4.2 建物の全壊率及び全壊棟数の期待値 ····· 6
4.3 建物倒壊による街路の閉塞確率 ····· 8
4.4 避難距離の解析（建物倒壊ありの場合） ····· 9

5. 結論 ····· 11

謝辞 ····· 11
参考文献 ····· 12

付録-1 ····· 13
付録-2 ····· 14

1. 緒論

津波避難に係るリスクには，地震動による建物倒壊で避難経路が閉塞するリスク，津波浸水で避難が不可能になるリスク等がある．津波避難の安全性を検証するため，こうした人的被害リスクを的確に評価する必要がある．そこで，津波避難シミュレーションを用いた津波避難安全性の評価手法の構築を目的とする．

まず，津波避難シミュレーションの既往の主な手法を整理する．ここでは，津波避難シミュレーションを，避難開始時間の推定，避難行動のモデル化及び避難行動の安全性評価という要素に分類して整理する．

避難開始時間の推定にあたっては，災害情報の効果，避難行動の個人差等を考慮する必要がある．永川ら[1)]は，災害情報の伝達経路・種類，地震の発生時間・大きさ，居住場所の立地条件及び津波経験の有無を因子とした避難開始時間を推定する手法を提案している．ただし，地域一律の値を与えるものであり避難行動の個人差は考慮されていない．避難行動の個人差を考慮したものとしては，武田ら[2)]が，高潮避難についてであるが，避難勧告・命令を受けた住民群ごとに乱数を用いて避難開始時間を仮定する手法を提案している．早川ら[3)]は，地震発生直後，警報発令及び津波の到達の3段階の避難率を推定し，それぞれの段階の発生時間に避難率を乗じ，それらの和をとることで当該地域の避難開始時間を推定する手法を提案している．佐藤ら[4)]は，非合理的要素に着目した避難開始行動について検討している．島田ら[5)]のように，アンケート結果から一定値を与える手法もある．

避難行動のモデル化にあたっては，群集密度の変化による避難速度の変化，追い越し等を考慮する必要がある．モデル化の方法は，マルチエージェントシミュレーション，物理モデル手法，セルオートマトン法等がある．掘ら[6)]は，それらの概要，適用範囲等をまとめ，マルチエージェントシミュレーションによるモデル化を行っている．物理モデル手法としては，個別要素法を用いた清野ら[7)]及び後藤ら[8)]，ポテンシャルモデルを用いた西畑ら[9)]がある．セルオートマトン法としては，白木ら[10)]がある．

避難行動の安全性評価にあたっては，評価対象の範囲，評価するリスクの種類等を考慮する必要がある．片田ら[11)]は，地図上に避難行動と浸水範囲とをアニメーションで重ねあわせることにより避難行動の安全性を直感的に表現する手法を提案し，地域全体を評価対象に浸水リスクを考慮した避難行動の安全性評価を行っている．佐藤ら[12)]は，地域全体を評価対象に浸水リスク及び地震による建物倒壊リスクを考慮した安全性評価の手法を提案している．また，三好ら[13)]は，津波避難ではないが，地域全体を評価対象に地震による出火・延焼リスクを考慮した安全性評価の手法を提案している．筆者ら[14)]は，個人を評価対象とした，地震による建物倒壊，建物火災，塀倒壊等で避難経路が閉塞する現象を考慮した，避難経路の安全性の解析手法について検討してきた．

そこで，本資料では，建物倒壊で避難経路が閉塞するリスクを考慮した避難所要時間と浸水開始時間とを比較する津波避難安全性の評価手法を構築したので報告する．また，沿岸地区の市街地特性の現地調査を行い，上の手法を用いて同地区の津波避難安全性の検討を行った．**図-1.1**に，本資料の構成を示す．**2章**は，市街地特性の現地調査について述べる．**3章**は，浸水予測計算について述べる．**4章**は，津波避難安全性の評価手法及び事例について述べる．**5章**は，結論である．

なお，本資料のケーススタディは津波避難安全性評価の手法を開発するために行った試行的なものであり，対象とした地区の安全性を具体的に評価するものではない．

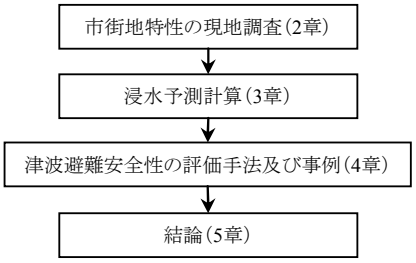


図-1.1　本資料の構成

2. 市街地特性の現地調査

2.1　対象とした地区

表-2.1に，現地調査の概要を示す．対象は，ある沿岸地区の東西約500 *m*，南北約900 *m*の範囲で，地区内の建物1,188棟，街路170区間である．街路とは，1/2,500都市計画図（白図）に記載されたものとし，私道は除外する．

2.2　調査項目及び調査手法

事前準備として，独立行政法人港湾空港技術研究所が詳細なレーザー測量の成果から作成した地形データ[15)]及び国土地理院の「海岸における3D電子地図」（国土地理院承諾　国地調社第29号）を用い，画像処理により，建物及び街路の輪郭線，建物の位置座標及び高さ，街路の交差点，変曲点等の位置での道路中心の標高をデータ化した地図をあらかじめ用意した（以下，「あらかじめ用意した地図」という）．

表-2.1　現地調査の概要

対　象	東西約500*m*・南北約900*m*の範囲内の 建物　1,188棟(全建物) 街路　170区間(全街路)
調査項目 (手法)	＜建物＞ 構造形式, 階数及び平面形状(目視調査) ＜街路＞ 塀の構造, 高さ及び位置(測定調査) 段差の段数及び位置(測定調査)
調査日	平成20年10月22日～24日(3日間)
調査員	熊谷兼太郎(国土交通省国土技術政策総合研究所) 村田　泰洋(国際航業株式会社)

そのうえで，現地において，地区内の全建物を対象にした構造形式，階数及び平面形状についての目視調査，地区内の全街路を対象にした塀及び段差の測定調査を行った. 調査日は, 平成20年10月22日～24日の3日間である. 調査員は2名で行った.

(1) 建物の構造形式，階数及び平面形状

建物の構造形式，階数及び平面形状を，外観の目視により調査した.

構造形式は，木造または非木造（鉄筋コンクリート造または鉄骨造）の二区分に分類した．**表-2.2**に，外観の目視の際の分類上の着眼点を示す．木造に分類したものは，3階建て以下の比較的低層の建物であり，切妻屋根を有し，目視できる構造材が木造の場合である．非木造に分類したものは，外壁材に長方形成型パネルが使用されている，目視できる構造材がコンクリート柱または鉄骨の場合である．これにより分類しがたい建物は，危険側に評価するため木造に分類した．**写真-2.1**に，建物の構造形式の調査状況を示す.

階数は，1階建て，2階建て，・・・の区分をあらかじめ用意した地図に書き込んで記録した.

平面形状は，現況とあらかじめ用意した地図に記載された輪郭線とを比較することにより，データ取得以降の建物の新設・取り壊し・改修，事前準備の画像処理の際の過誤等により発生したと考えられる平面形状の違いをあらかじめ用意した地図に書き込んで記録した.

(2) 塀，段差等の調査

街路に面する塀，街路の途中の段差，高低差及び幅員について現地での測定等により調査した.

街路に面する塀の構造は，ブロック塀及び非ブロック塀（石塀及びコンクリート塀を含む）の二区分に区分した．塀の高さは代表的な高さを測定することとし，ひとつづきの塀であっても高さが途中で大きく変化している場合はそれぞれを個別に測定して記録した．また，その位置は, あらかじめ用意した地図に書き込んで記録した. **写真-2.2**に，塀の高さの調査状況を示す.

街路の途中の段差は，段数及び位置をあらかじめ用意した地図に書き込んで記録した．**写真-2.3**に，街路の途中の段差の例を示す.

表-2.2　構造形式の分類上の着眼点

構造形式の分類	分類上の着眼点
木造	・比較的低層(3階建て以下) ・切妻屋根を有する ・目視できる構造材が木造
非木造(鉄筋コンクリート造または鉄骨造)	・外壁材に長方形成型パネルの使用 ・目視できる構造材がコンクリート柱または鉄骨

写真-2.1　建物の構造形式の調査状況

写真-2.2　塀の高さの調査状況

写真-2.3　街路の途中の段差

高低差は，事前準備の段階で街路の交差点，変曲点等の標高値を取得しているので，それを利用した．また，幅員は1/2,500都市計画図（白図）より読み取った．

2.3 調査結果

(1) ノード・リンクモデルによる構造化

調査結果を用いて，建物及び街路をノード・リンクモデルで構造化した．ここで，ノードとは建物中心点，街路の交差点，変曲点等の点データであり，リンクとはノード間を接続する線データである．ノード及びリンクにはそれぞれ属性データが付与されている．**表-2.3**に示す．建物中心点の場合はノードには属性データとして，ノード番号，建物番号，構造コード，建築面積，階数及び接続している街路のノード番号が与えられている．リンクには属性データとして，リンク番号，幅員，リンクの両端点の番号及び標高，勾配，階段フラグ等が与えられている．構造化したデータは，汎用的なデータ形式であるESRI社製ArcGISのshape形式で電子化した．なお，shape形式のデータは，dbf（属性の情報），shp（図形座標の情報），shx（レコードインデックス），prj（空間参照の情報）等の拡張子名を持つファイル群から構成される．

写真-2.4に，対象とした地区の航空写真を示す．写真右側（東側）に水域があり，そこより左側（西側）に市街地が広がっている．**図-2.1**に，構造化した建物及び街路を示す．

(2) 現地調査によるデータ補正状況

現地調査によりあらかじめ用意した地図上の建物を追加・削除・修正した建物数は，追加が24棟（全体1,188棟の約2.0%），削除が37棟（同約3.1%），建物の輪郭線の修正が86棟（同約7.2%）であった．独立行政法人港湾空港技術研究所が作成した地形データ[15]は平成17年1月に

表-2.3 ノード及びリンクに付与された属性データ

	属性データ	格納ファイル形式
ノード	ノード番号，建物番号（以下，建物中心点の場合），構造コード，建築面積，階数，接続している街路のノード番号	dbf
	座標	shp
リンク	リンク番号，幅員，端点ノード1の番号，端点ノード2の番号，端点ノード1の標高，端点ノード2の標高，端点1から端点2方向の勾配，階段フラグ，歩行速度低減率	dbf
	端点ノード1の座標，端点ノード2の座標	shp

この写真は，国土地理院の「海岸における3D電子地図」に関する資料を使用したものである（国土地理院承諾　国地調社第29号）

写真-2.4 対象とした地区

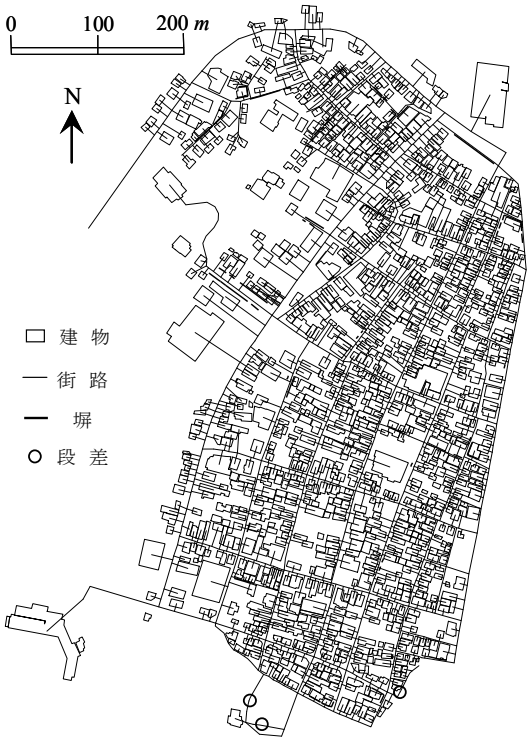


図-2.1 構造化した建物及び街路

測量されたものであり，今回の現地調査（平成20年10月）までに約3年9ヶ月が経過している．従って，建物の追加・削除・修正は，この期間の建物の新設・取り壊し・改修によるもの，または，あらかじめ用意した地図の作成の画像処理の際の過誤によるものと考えられる．

(3) 塀，段差及び高低差の取扱い

塀（ブロック塀及び非ブロック塀，以下同じ）は地区全体で60箇所だった．段差は3箇所だった．また，地区内の高低差はほとんどなかった．数が比較的少ないことから，今回の避難経路安全性の評価では，塀，段差及び高低差による影響を考慮しないこととした．

なお，街路の幅員が小さく塀の倒壊による経路閉塞の危険性が大きいと考えられる場合，段差が多く避難者の行動を制約すると考えられる場合，坂道の勾配が大きく避難速度が変化すると考えられる場合等は，それらの要因が津波避難安全性に影響すると考えられるので，考慮する必要がある．

3. 浸水予測計算

3.1 計算手法

(1) 基礎方程式及び差分スキーム

津波による浸水予測のための津波数値計算を行った．流体運動の基礎方程式は，運輸省港湾技術研究所の津波・高潮数値計算システム[16]と同様に，Navier-Stokesの運動方程式を鉛直方向に積分した非線形長波方程式（浅水理論式）及び鉛直方向に積分した連続式を用いる．また，差分スキームは，空間差分がスタッガード格子，時間差分はリープ・フロッグ法である．

(2) 計算領域及び計算条件

計算領域は，水平方向の計算格子間隔を外洋領域から港湾領域にむかい1,350，450，150，50，25，12.5 *m*として配置した．計算時間間隔はΔt=0.1 sとした．沖側境界条件は最も大きい外洋領域が自由透過，それ以外の領域が隣接する領域と水位及び流量を結合している．最も小さい12.5 *m*格子の領域では，陸側境界条件として浸水遡上計算を行い，土地利用を考慮した底面摩擦を与える．潮位は，H.W.L.（=T.P.+0.696 *m*）とした．想定震源域は中央防災会議の報告[17]を参考に，想定東海地震＋付加断層ABCとした．また，湾口部の構造物について，現況（平成18年時点）の状況を想定した計算を行った．

(3) 計算時間及び出力

計算時間は地震発生後から180分間とした．また，最も小さい12.5 *m*格子の領域について，各格子の水位及び流速の計算結果を1秒おきにそれぞれ出力し，外部記憶装置に保存した．

3.2 計算結果

図-3.1に，浸水開始時間の分布を対象地区に重ねて示す．地区の沿岸部（東側）の最も早いところで地震発生約18分後に浸水開始し，内陸部（西側）にむかって浸水が時間的に拡大し約28分後に内陸部まで到達する結果となった．

図-3.2に，最大浸水深の分布を示す．沿岸部の北側で最大浸水深が2 *m*以上となり，対象地区のほとんどの範囲が0.5 *m*以上浸水する結果となった．

図-3.3に，最大流速の分布を示す．沿岸部で2m/s以上となり，対象地区のほとんどの範囲で0.5m/s以上の流速が生じる結果となった．

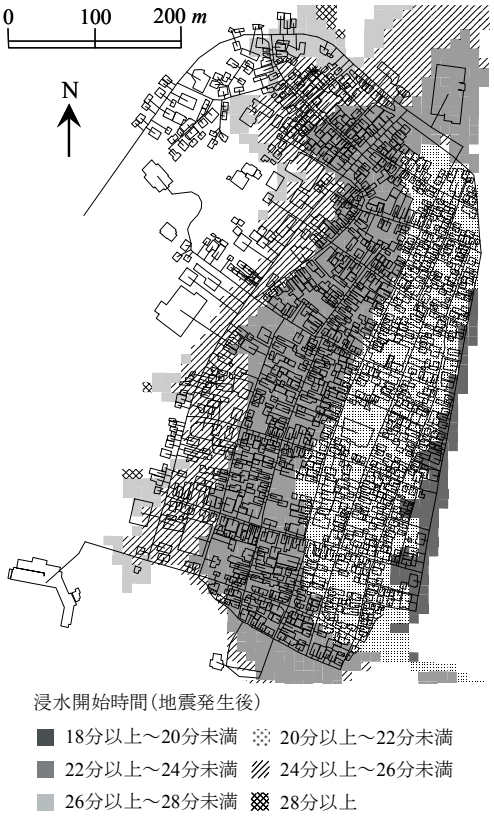


図-3.1 浸水開始時間の分布

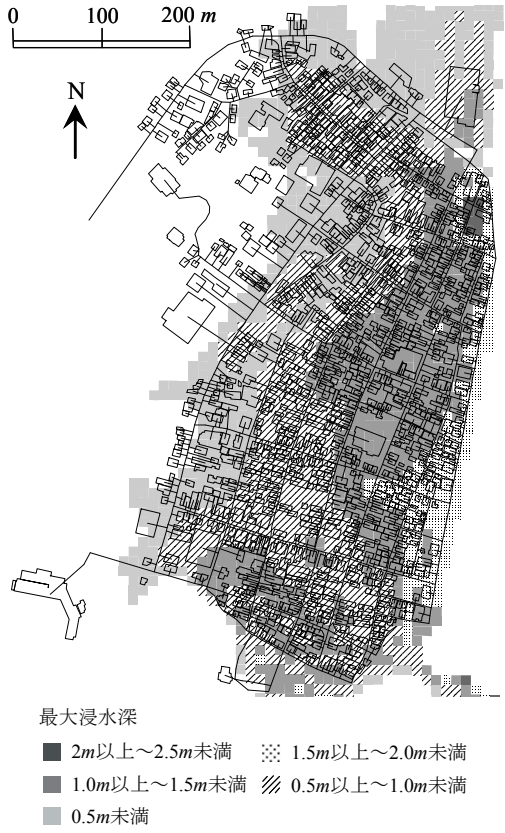


図-3.2　最大浸水深の分布

図-3.3　最大流速の分布

4. 津波避難安全性の評価手法及び事例

4.1　避難距離の解析（建物倒壊なしの場合）

(1) 解析手法

2.3節で構造化した建物・街路データを用い，避難経路の解析を行った．まず，建物倒壊なしの場合について行った．対象地区には，津波避難ビル（民間の堅牢なビルで一時的な津波避難に用いる施設．**付録-1**に写真を示す）が12棟，避難場所（小学校等の比較的大規模な施設）が3箇所（いずれも平成19年6月時点）の計15棟がある．

解析は，出発地点となる地区内の建物から津波避難ビルまたは避難場所（以下，「津波避難ビル等」という）まで，出発地点となる建物ごとに避難経路を検索する．内閣府のガイドライン[18]を参考に，経路選択モデルとして以下の条件を設定して経路を検索した：

①最寄りの津波避難ビル等まで最短経路を避難する

②街路を横断して海側には避難しない

経路検索にはESRI社製ArcGIS（ArcView Version9.3）のNetwork Analyst機能を用いた．

(2) 解析結果

図-4.1に，避難距離の分布を示す．津波避難ビル等は太線で囲って示した．各建物の色は，当該建物から最寄りの津波避難ビル等までの避難距離を示す．同じ結果を，**図-4.2**に避難距離10 *m*ごとの度数分布でも示した．対象とした921棟について，避難距離の平均値は190 *m*，最小値は22 *m*，最大値は729 *m*，標準偏差は137 *m*となった．内閣府のガイドライン[18]を参考に歩行速度を1 *m/s*とすると，避難所要時間は平均3分10秒，最大12分9秒となる．

そこで，対象地区のうち浸水開始が比較的早い一部の地区について詳細に検討した．

図-4.3に，詳細検討の範囲を太線で囲って示す．大きさは東西約200 *m*，南北約400 *m*，範囲内の建物数は192棟である．3.2節の浸水予測結果を使って，各建物中心位置での地震発生後の浸水開始時間を抽出した．その結果は，19分32秒～22分53秒となった．

つぎに，避難開始時間を永川ら[1]の手法を用いて算定した．その際，意思決定段階の影響因子について地震インパクトは「大」，場所は「危険」，時間は「夜間」，津波経験は「伝聞のみ」，情報インパクトは「聞かないうちに避難」を設定した．情報の要伝達時間について発信者は「市町村」，時間は「夜間」と設定した．その結果，避難開始時間は地震発生後16分4秒となった．

以上より，各建物の浸水開始時間から避難開始時間と避難所要時間とを差し引いた避難余裕時間を算定した．

図-4.4に，避難余裕時間の分布を示す．避難余裕時間

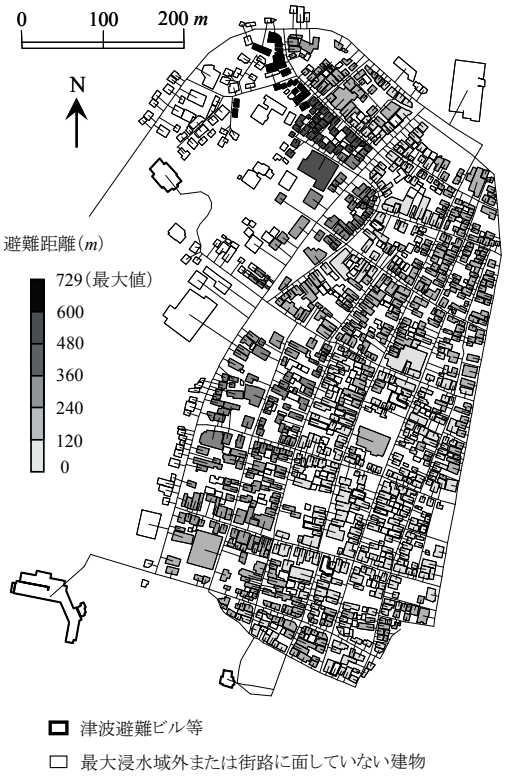


図-4.1 避難距離の分布（建物倒壊なしの場合）

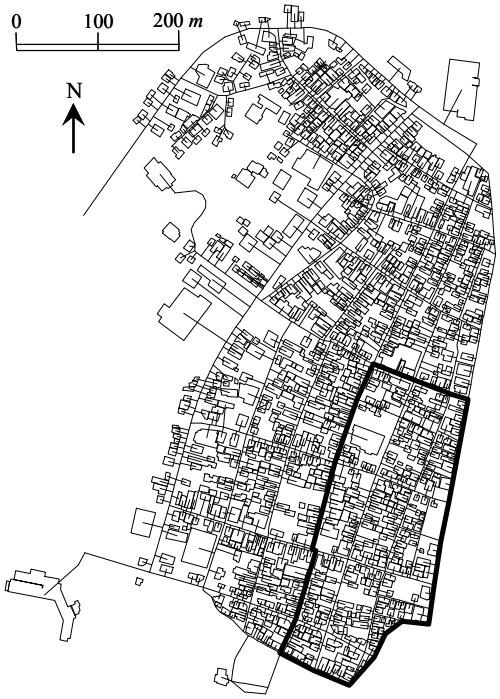


図-4.3 詳細検討の範囲

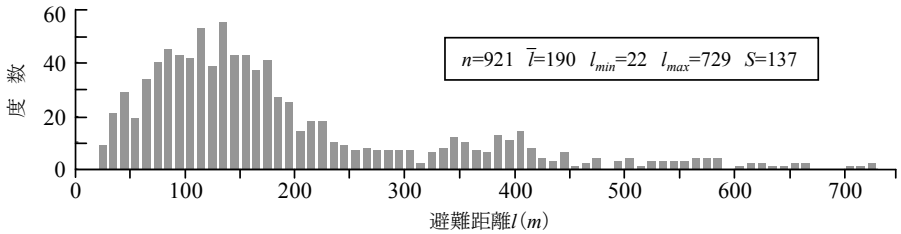


図-4.2 避難距離の度数分布

図-4.4 避難余裕時間の分布

は最小1分14秒，最大6分36秒の間で分布した．避難余裕時間が負となるものはなかったので，建物倒壊なしの場合，設定した条件のもとでは，詳細検討の範囲内の建物から津波避難ビル等まで浸水開始時間までに避難完了できる結果となった．

ただし，ここで用いた「浸水開始時間」は，避難者の出発地点の建物の中心位置における浸水開始時間である．避難者は津波避難ビル等にむかって移動するので，避難者の移動途中の位置または到着場所の浸水開始時間を考慮していない点に注意が必要である．

また，今回の検討では，各津波避難ビル等の収容可能人数と集まると想定される避難者数との比較は行っていないので，その点についても検討が必要である．

4.2 建物の全壊率及び全壊棟数の期待値

気象庁震度と地震動最大速度との関係として，以下の

表-4.1　式(1)の定数

文　献	*a*	*b*	I=5.75のときの *x*(*cm/s*)	備　考
童ら (1996)	2.30	2.01	52.0	
金谷ら (1997)	2.258	2.008	54.8	I=4～7が適用範囲
翠川ら (1999)	2.68	1.72	60.9	

形の式がいくつか提案されている[19)−21)]：

$$I = a + b \cdot \log_{10} x \qquad (1)$$

ここで，*I*は震度，*a*，*b*は定数，*x*は地震動最大速度（*cm/s*）である．気象庁の解説[22)]によると，例えば，震度6弱は計測震度で5.5以上6.0未満，震度6強は6.0以上6.5未満に相当すると示されているので，それぞれ対応する*I*は5.75, 6.25とした．*a*，*b*は文献19)−21)のうちから適切な値を利用し，地震動最大速度*x*を算定できる（**表-4.1**）．文献19)−21) で定数*a*，*b*の違いが生じている要因は，震度と地震動最大速度との相関をとるために使用したサンプルデータの違い，サンプルデータの処理方法の違い（例えば，最大速度として速度の3成分のうち最大のものをとる，または，水平成分の合成ベクトルの大きさをとる）等である．どの文献の値を用いるかについては，検討の対象とする地域で想定される地震動の特性と，文献19)−21)でサンプルデータの対象となった地震動の特性とが類似しているものを選ぶことが考えられる．しかし，地震動の特性の類似の判断は難しい．従って，試行錯誤的に文献19)−21)の定数*a*，*b*の値を利用することが考えられる．本資料では，試行的に童ら[19)]の定数*a*=2.30，*b*=2.01を用いた．対象地区の想定震度は震度6弱であり，*x*=52.0 *cm/s*となった．なお，*a*，*b*に文献20)または21)の値を用いた場合については，今後詳細に比較していく必要がある．

村尾ら[23)]により，地震動最大速度*x*（*cm/s*）と構造別・建築年別の全壊率との関係が標準正規分布の累積確率分布関数Φを用いて与えられている．

$$P_c(x) = \Phi((\ln x - \lambda)/\zeta) \qquad (2)$$

ここで，P_cは全壊率，係数λ，ζはそれぞれln *x*の平均値及び標準偏差であり，構造形式別・建築年代別のλ，ζが文献23)で示されている．ある建物*i*の構造形式及び建築年が分かれば，当該建物の全壊率P_{ci}を算定できる．

図-4.5は，式(2)の構造形式別の地震動最大速度と全壊率の関係である．今回の検討では建物の建築年に関する情報は得られなかったため，λ，ζは建築年によらない平均値として文献23)に示されているものを用いた．*x*=52.0 *cm/s*のとき，木造の全壊率は1.69%，鉄骨造の全壊率は0.298%，鉄筋コンクリート造の全壊率は0.240%となった．そこで，木造建物の全壊率を1.69%，非木造建物の全壊

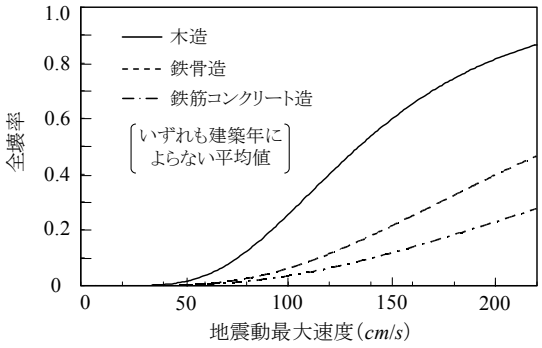


図-4.5　地震動最大速度と全壊率の関係

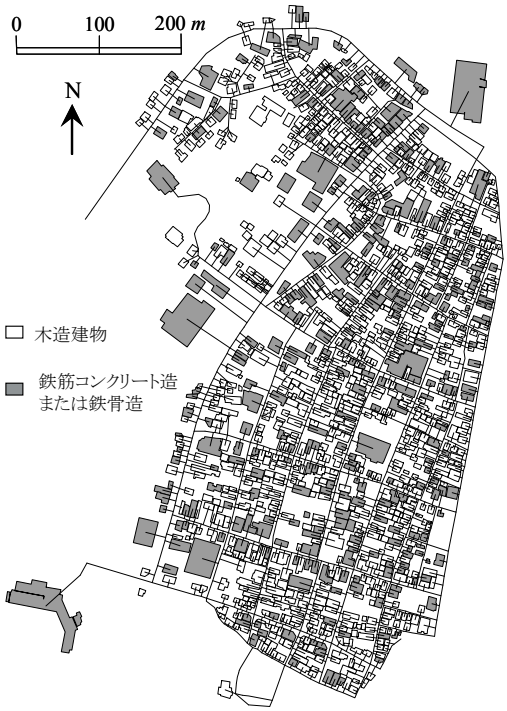


図-4.6　建物の構造形式の分布

表-4.2　構造形式別の棟数及び全壊棟数の期待値

構　造　形　式	棟数	想定震度	全壊率 (%)	全壊棟数の期待値
木造	861	6弱	1.699	15
鉄筋コンクリート造または鉄骨造(非木造)	327	6弱	0.298	1
(計)	1,188			16

率を0.298%とした．係数λ，ζに建築年によらない平均値を用いたこと，液状化による倒壊を考慮しないこと等の影響については，今後検討が必要である．

図-4.6に，建物の構造形式の分布を示す．図中に白色で示した建物の構造形式は木造であり，上述のとおり全壊率はいずれも1.69%である.灰色で示した建物の構造形式は非木造であり，全壊率はいずれも0.298%である．構造形式jの棟数をn_j，構造形式jの全壊率をP_{cj}とすると，全壊棟数の期待値E_j及び地区全体の全壊棟数の期待値Eは，

$$E_j = n_j \cdot P_{cj} \tag{3}$$

$$E = \sum_j E_j \tag{4}$$

表-4.2に，構造形式別の棟数，全壊棟数の期待値等を示す．全壊棟数の期待値は木造が15棟，非木造が1棟で計16棟となった．

4.3 建物倒壊による街路の閉塞確率

倒壊建物はガレキを発生させる．ガレキが街路に流出すると，建物前面の街路が通行できなくなり閉塞する可能性がある．**図-4.7**は，国土交通省の報告書[24)]によるガレキ流出，閉塞確率等の関係のイメージである（筆者が一部修正）．建物に接している街路の幅員が小さくなるほど，建物倒壊で生じたガレキによる閉塞確率は大きくなる関係にあると考える．さらに，避難者が通過するためにはある程度の幅員が必要になるので，閉塞確率は，道路幅員から避難者が通過するのに必要な幅員を差し引いた長さに関係すると考えるものである．

街路側にガレキが必ず流出すると仮定したとき，国土交通省の報告書[24)]は，建物前面の道路の閉塞確率P_bを算

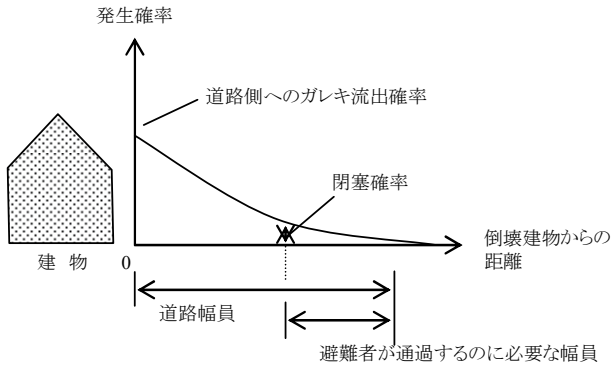


図-4.7 ガレキ流出，閉塞確率等の関係のイメージ（国土交通省の報告書[24)]を筆者が一部修正）

定する以下の式を提案している：

$$P_b = \exp\left(-\frac{W_r - W_t}{a}\right) \tag{5}$$

$$a = 2.41 \cdot X_1^{0.379} + 0.199 \cdot X_2^{2.23} + 4.64 \cdot X_3^{12.0} \tag{6}$$

ここで，W_rは街路の幅員（m），W_tは避難者が通過するのに必要な幅員（m），aは建物から街路方向に広がるガレキの幅の地域全体の平均的な値を表し，家田ら[25)]により提案されたものを修正したものである．X_1は地域全体の平均的な全壊率であり，X_2は地域全体の平均的な建物の階層，X_3は地域全体の平均的な建築密度である．

ここで，式(5)及び式(6)は，地域全体のマクロ的な分析に適用される考え方であり，今回検討している建物一棟一棟に適用するため修正する必要がある．家田ら[25)]の提案はもともと，建物一棟一棟に対するaとして

$$a = 2.32 \cdot X_1^{0.379} + 0.189 \cdot X_2^{2.23} + 4.41 \cdot X_3^{12.0} \tag{6}'$$

を提案していた．そこで，今回の検討では式(6)に代えて式(6)'を用い，かつ，建物のセットバックの効果等を補正する係数0.9を式(5)に用いて，

$$P_b = \exp\left(-0.9 \times \frac{W_r - W_t}{a}\right) \tag{5}'$$

$$a = 2.32 \cdot X_1^{0.379} + 0.189 \cdot X_2^{2.23} + 4.41 \cdot X_3^{12.0} \tag{6}''$$

とした．式(6)'と式(6)"は同じである．式(5)'及び式(6)"を用い，建物倒壊による当該建物の前面街路の閉塞確率P_bを建物ごとに算定した．W_rは**2.3節**で作成した街路幅員を用い，W_t=0.6 mとした．X_1は，各建物の全壊率は個別に式(2)によって既に求めてあるので，X_1=1とした．X_2は，現地調査によって収集した階層数（1，2，・・・）を建物ごとに与える．X_3は，平均的な市街地の値（0.3～0.4程度）を参考にX_3=0.35とした．

こうして得られたP_bと，式(2)で求まる全壊率P_cとの積をとり，想定地震が発生した際の各建物iの前面街路の閉塞確率P_iを算定した．すなわち，

$$P_i = P_{bi} \cdot P_{ci} \tag{7}$$

図-4.8に，各建物iの前面街路の閉塞確率P_iの分布を示す．これは「想定地震（震度6弱）が発生した場合に，各建物が前面の街路を閉塞する確率」であり，1.4%からほぼゼロまでの範囲で分布した．

図-4.8 各建物の前面街路の閉塞確率の分布

1,188棟の閉塞確率の和をとることで，対象としている地区内で建物が倒壊して街路を閉塞する箇所の期待値Nを算定できる．すなわち，

$$N_{stochastic} = \sum_i P_i \tag{8}$$

その結果，対象とした地区の閉塞箇所の期待値は4.11箇所となった．すなわち，対象とした地区では想定地震（震度6弱）の地震が発生した場合，建物倒壊により4箇所程度の街路が閉塞することとなった．

この手法は，倒壊する建物を確定論的に決定していないため，街路の閉塞箇所も確定論的に決定することはできない．そこで，**4.4節**では，乱数を用いて倒壊する建物を確定論的に決定し，街路の閉塞箇所も確定論的に決定するケーススタディを行った．

4.4 避難距離の解析（建物倒壊ありの場合）

(1) 解析手法

図-4.9に，ケーススタディの手順を示す．まず，線形合同法により擬似乱数を生成した．線形合同法の擬似乱数は以下の漸化式で与えられる：

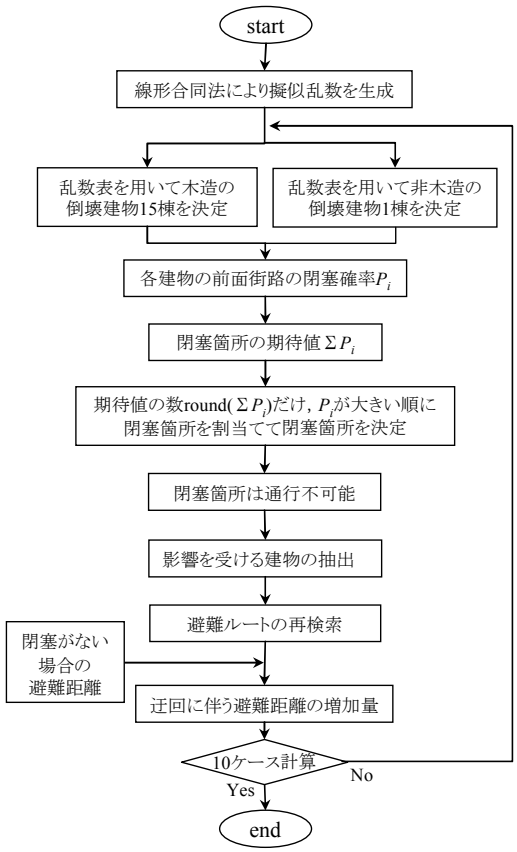


図-4.9 ケーススタディの手順

$$X_{n+1} = (A \cdot X_n + B) \bmod M \tag{9}$$

ここで，A，B，Mはいずれも定数である．建物が1,188棟あり，1～約1,200の範囲で周期性の小さい乱数を生成したいので，1,188よりも大きい素数をA，B，Mとして与えた．乱数を利用するためには，乱数X_1，X_2，・・・に加えて暗号鍵（乱数表の使用開始位置を定める）Y_1, Y_2, ・・・が必要である．暗号鍵の漸化式は式(9)と同形とする．それぞれ，乱数表のA=1193，B=1201，M=1213，X_0=1，暗号鍵表のA=1217，B=1223，M=1229，Y_0=1として，X_1～X_{1200}の乱数及びY_1～Y_{1200}の暗号鍵を生成した．

乱数及び暗号鍵を用いて倒壊建物を決定する．**4.2節**より，全壊棟数の期待値は木造が15棟，非木造が1棟の計16棟である．まず，暗号鍵の1番目（Y_1）の数字1211は生成した乱数の数1200を超えているので除外し，2番目（Y_2）の数字である210を得る．乱数の210番目（X_{210}）の数字は1107なので，**2.3**(1)で割り振った建物番号が1107の建物を倒壊建物とする．つぎに，X_{211}は895であるので，建物番号が895の建物を倒壊建物とする．このようにして，

木造15棟，非木造1棟の計16棟を決定する．別のケースを検討するときは，暗号鍵の次の数字（Y_3）として1161を得て，同様に繰り返す．こうして16棟の倒壊建物（k=1,2,・・・,16）を確定的に定めることが出来た．

次に，4.3節の式(5)'及び式(6)"を用い，16棟の建物の前面街路の閉塞確率P_bを算定した．算定された16棟の閉塞確率の和をとることにより閉塞箇所の期待値を得る：

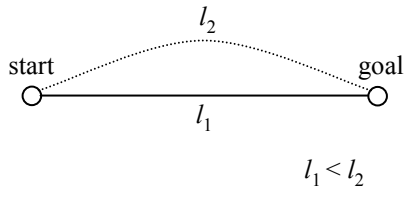
$$N_{deterministic} = \sum_{k} P_{bk} \qquad (10)$$

(10)式の期待値を四捨五入し，その数だけ，16棟のうちで閉塞確率P_bが大きいものから順に建物を選び，当該建物の前面街路が閉塞するとみなし通行不可能とした．なお，大きいものから順に選んでいったとき，閉塞確率P_bが同じ値の建物がある場合は，切り上げて閉塞箇所に含めた．**4.1節**でその閉塞箇所を通行することとなっていた建物を「影響を受ける建物」として抽出し，通行不可能な街路を迂回するように避難経路の再検索を行った．経路検索には，**4.1節**と同様にESRI社製ArcGIS（ArcView Version9.3）のNetwork Analyst機能を用いた．

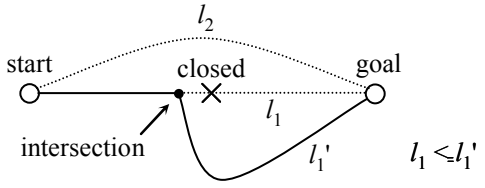
図-4.10に，避難経路の閉塞箇所を迂回する方法を示す．閉塞なしの場合，**4.1**(1)の条件でl_1を選択する．閉塞ありの場合（×印），当該閉塞箇所の直前の交差点から最短経路を再検索しl_1'を選択する．避難者は自宅を出発した時点では避難経路の閉塞の情報は入手していないので予定通りの経路を出発し，閉塞箇所の直前の交差点で閉塞の情報を入手し最短経路の再検索を行うこととした．

そして，**4.1節**で算定した避難距離と比較することで，迂回に伴う避難距離の増加量を算定した．

ケーススタディは10ケース繰返し行った．



(1) 閉塞なし



(2) 閉塞あり

図-4.10　避難経路の閉塞箇所を迂回する方法

(2) 解析結果

表-4.3に，ケーススタディの結果を示す．閉塞箇所の期待値$N_{deterministic}$は3箇所ないし6箇所となり，10ケースの平均は4.63箇所であった．影響をうける建物は14～76棟となり，10ケースの平均は34棟であった．迂回に伴う避難距離の平均増加量は29～212 mとなり，10ケースの平均は86 mであった．内閣府のガイドライン[18]を参考に歩行速度を1 m/sとすると，建物倒壊なしの場合と比較して，建物倒壊ありの場合に避難所要時間は平均で約1分半増加することとなる．**付録-2**の**付録図-2.1～10**に，10ケースのケーススタディの結果を参考としてそれぞれ示す．

閉塞箇所には，閉塞すると多数の建物が影響をうけるものと，閉塞しても他の建物に影響を与えない場所とがある．**図-4.11**に，ケースNo.1の影響を受ける建物41棟について避難距離の増加量をそれぞれ示す．そのうち，例えばA群は閉塞箇所のうちのある1箇所の影響を受けて迂回しているものであり，そこから先の迂回による避難距離の増加量は同じとなっていた．このように影響を受ける建物が多く，かつ，避難距離の増加量が大きくなる場合は避難行動に与える影響が大きいといえる．**付録-2**の**付録図-2.11**に，ケースNo.2～10についてそれぞれ示す．

4.1節と同様に，対象地区のうち浸水開始が比較的早い一部の地区について詳細に検討する．本節の詳細検討の範囲も**4.1節**と同じ範囲（**図-4.3**）であり，建物数は192

表-4.3　ケーススタディの結果

ケースNo.	倒壊建物（棟）		閉塞箇所の期待値（箇所）	影響を受ける建物（棟）	避難距離の平均増加量（m）
	木　造	非木造			
1	15	1	4.30	41	212
2	15	1	5.28	31	59
3	15	1	4.40	76	82
4	15	1	4.56	14	72
5	15	1	3.53	31	74
6	15	1	5.92	51	29
7	15	1	4.09	20	64
8	15	1	6.12	35	103
9	15	1	3.77	18	70
10	15	1	4.32	18	90
平均	**15**	**1**	**4.63**	**34**	**86**

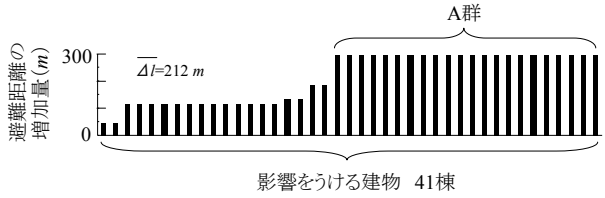


図-4.11　各建物の避難距離の増加量（ケースNo.1）

棟である．**表-4.4**に，ケーススタディのケースごとに，詳細検討の範囲内の「影響を受ける建物」の棟数，迂回による避難距離の増加量を示した．また，歩行速度を1 *m/s*とし避難開始時間を**4.1節**と同様に地震発生後16分4秒とした場合の，各建物の浸水開始時間から避難開始時間と避難所要時間とを差し引いた避難余裕時間を算定し，影響を受ける建物のうち避難余裕時間が正である建物数と負である建物数の内訳を示した．

その結果，ケースNo.5及びNo.10で，それぞれ9棟及び10棟のうちの1棟ずつ避難余裕時間が負となる建物が生じた．**4.1節**（建物倒壊なし）での検討の結果は，詳細検討の範囲内の建物については全て，浸水開始時前に津波避難ビル等まで避難完了できる（避難余裕時間が正）となっていた．避難経路の閉塞による迂回を考慮した結果，浸水開始時間までに津波避難ビル等に到達できない可能性があることが分かった．

ただし，**4.1節**と同様，ここで用いた「浸水開始時間」は，避難者の出発地点の建物の中心位置における浸水開始時刻である．避難者は津波避難ビル等にむかって移動するので，避難者の移動途中の位置または到着場所の浸水開始時間を考慮していない点に注意が必要である．

表-4.4　ケーススタディの結果（詳細検討）

ケースNo.	詳細検討の範囲内の「影響を受ける建物」（棟）	避難距離の増加量（*m*）			「影響を受ける建物」の避難余裕時間（1 *m/s*の場合）	
		平均	最小	最大	正となる建物数（棟）	負となる建物数（棟）
1	0	-	-	-	-	-
2	11	45	45	45	11	0
3	31	83	64	131	31	0
4	8	88	64	125	8	0
5	9	131	134	174	8	1
6	10	49	2	88	10	0
7	4	98	60	173	4	0
8	25	82	60	128	25	0
9	17	74	68	123	17	0
10	10	133	131	144	9	1

また，今回は10ケースのケーススタディを行ったが，ケース数を増やすことにより避難行動への影響をより詳細に把握できる可能性があり，今後の課題である．

津波避難に係るリスクとして，今回検討したもののほかに，地震による火災延焼のリスク，土砂崩れで避難経路が閉塞するリスク等が考えられる．それらのリスクをふまえた津波避難安全性の評価手法の検討についても，今後の課題である．

5. 結論

本資料では，建物倒壊で避難経路が閉塞するリスクを考慮した避難所要時間と浸水開始時間とを比較する津波避難安全性の評価手法の構築とともに，沿岸地区の市街地特性の現地調査を行い津波避難安全性の検討を行った．なお，本資料のケーススタディは津波避難安全性評価の手法を開発するために行った試行的なものであり，対象とした地区の安全性を具体的に評価するものではない．

結果は以下の通りである：

- 津波による被害が懸念される沿岸地区において現地調査等を行い，ノード・リンクモデルを用いて建物及び街路を構造化した．
- 非線形長波方程式及び鉛直方向に積分した連続式を用いた津波数値計算を行い，浸水開始時間等を把握する浸水予測を行った．
- 最短経路を避難する津波避難距離の解析を行い，建物倒壊なしの場合は，対象とした地区の避難距離の平均値は約190 *m*となった．
- 建物の構造形式，想定震度等を考慮した建物の全壊率及び全壊棟数の期待値を算定し，対象とした地区の木造建物の全壊率は1.69%，全壊棟数の期待値は15棟，非木造建物の全壊率は0.298%，全壊棟数の期待値は1棟となった．
- 建物倒壊による街路の閉塞確率を算定し，対象とした地区で想定地震が発生した場合に確率は1.4%からほぼゼロの範囲で分布し，閉塞箇所の期待値は4.11となった．
- 建物倒壊による街路の閉塞箇所を確定論的に推定する手法を構築し，ケーススタディにより，対象とした地区で想定地震が発生した場合に影響を受ける建物は平均34棟，建物倒壊なしの場合と比較して街路の閉塞箇所を迂回にすることによる避難距離の平均増加量は86mとなった．
- 対象地区のうち浸水開始が比較的早い一部の地区について，避難開始時間を考慮し，各建物の浸水開始時間から避難開始時間と避難所要時間（出発してから避難場所に到達するまでの時間）とを差し引いた避難余裕時間について検討した．

（2009年7月8日受付）

謝　辞

本研究を実施するにあたって，財団法人鉄道・運輸施設整備支援機構の運輸分野における基礎的研究推進制度

を利用しました．独立行政法人港湾空港技術研究所津波防災研究センターの富田考史上席研究官にはデータの使用を快く許可して頂きました．国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室の太田綾子さんにはデータ入力，解析作業等で助力を頂きました．上の方々をはじめご協力頂いた各位にここに感謝の意を表します．

参考文献

1) 永川賢治・今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価法の提案，津波工学研究報告，東北大学工学部，第 17 号，pp.79-94，2000.
2) 武田誠・井上和也・戸田圭一・川池健司：高潮ハザードマップと避難に関する二･三の検討, 海岸工学論文集, 土木学会，第 44 巻，pp.356-360，1997.
3) 早川哲史・今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学，日本自然災害学会，pp.51-66，2002.
4) 佐藤太一・河野達仁・越村俊一・山浦一保・今村文彦：認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発ー避難シミュレーションへの心理的要素の導入ー，地域安全学会論文集，No.10，pp.393-400，2008.
5) 島田富美男・村上仁士・上月康則・杉本卓司・西川幸治：津波による人的被害予測に関する一考察，海岸工学論文集，土木学会，第 46 巻，pp.361-365，1999.
6) 堀宗朗・犬飼洋平・小国健二・市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究，社会技術研究論文集，Vol.3，pp.138-145，2005.
7) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一：被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.233-244，1996.
8) 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎：個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション，海岸工学論文集，土木学会，第 51 巻，pp.1261-1265，2004.
9) 西畑剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，海洋開発論文集，土木学会，第 21 巻，pp.163-168，2005.
10) 白木渡・井面仁志・有友春樹：Live Design のための参加型避難シミュレーションシステムの開発, 第 61 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.379-380，2006.
11) 片田敏孝・桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ･シミュレータの開発，土木学会論文集 D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006.
12) 佐藤広章・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健悟・大谷寛：地震による家屋の倒壊を考慮した津波来襲時における避難に関する一考察，海岸工学論文集，土木学会，第 49 巻，pp.311-315，2002.
13) 三好孝典・松下義男・橋本済・糸井川栄一・村尾修：出火・延焼のリスクを考慮した広域避難計画に関する研究，地域安全学会論文集，No.10，pp.105-110，2008.
14) 熊谷兼太郎・小田勝也・土方聡・岡秀行：津波時の避難シミュレーションシステム及びモデル地域における構築，土木計画学研究･講演集，土木学会，Vol.33，No.270，2006.
15) 独立行政法人港湾空港技術研究所：平成 17 年度詳細地形データ等作成業務，2006.
16) 運輸省港湾技術研究所：津波・高潮数値計算システム取扱説明書（プログラム・マニュアル），50p，1996.
17) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会報告，9p，2001.
18) 内閣府政策統括官（防災担当）・津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン，p.11，2005.
19) 童華南・山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，東京大学生産技術研究所，48 巻 11 号，pp.547-550，1996.
20) 金刺靖一・金子史夫：計測震度と物理量の関係について，応用地質技術年報兵庫県南部地震特集号，pp.85-96，1997.
21) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さ指標との関係，地域安全学会論文集，Vol.1，pp.51-56，1999.
22) 気象庁：気象庁震度階級の解説，p.17，2009.
23) 村尾修・山崎文雄：震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，第 555 号，pp.185-192，2002.
24) 国土交通省：国土交通省総合技術開発プロジェクト循環型社会および安全な環境形成のための建築・都市基盤整備技術の開発　まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発（防災まちづくり総プロ）報告書，pp.200-275，2003.
25) 家田仁・望月拓郎・上西周子：街路閉塞現象による機能的障害と地区の危険度評価法，阪神・淡路大震災調査研究論文集，土木計画学研究委員会，pp.433-440，1997.

付録-1　現地調査の対象地区内の津波避難ビル

No.1

No.2

No.3

No.4

No.5

No.6

No.7

No.8

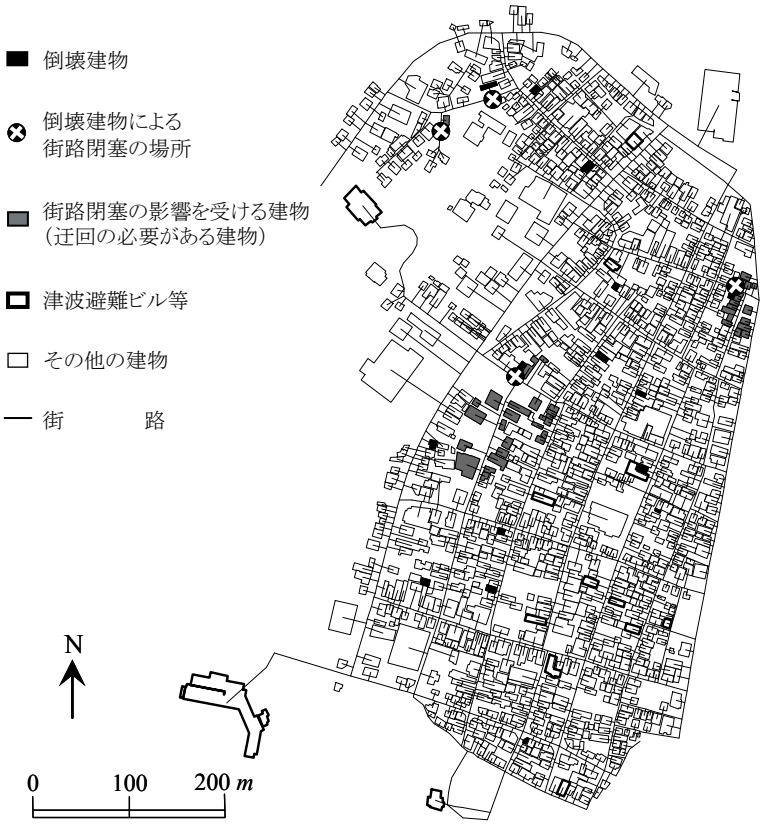
No.9

No.10

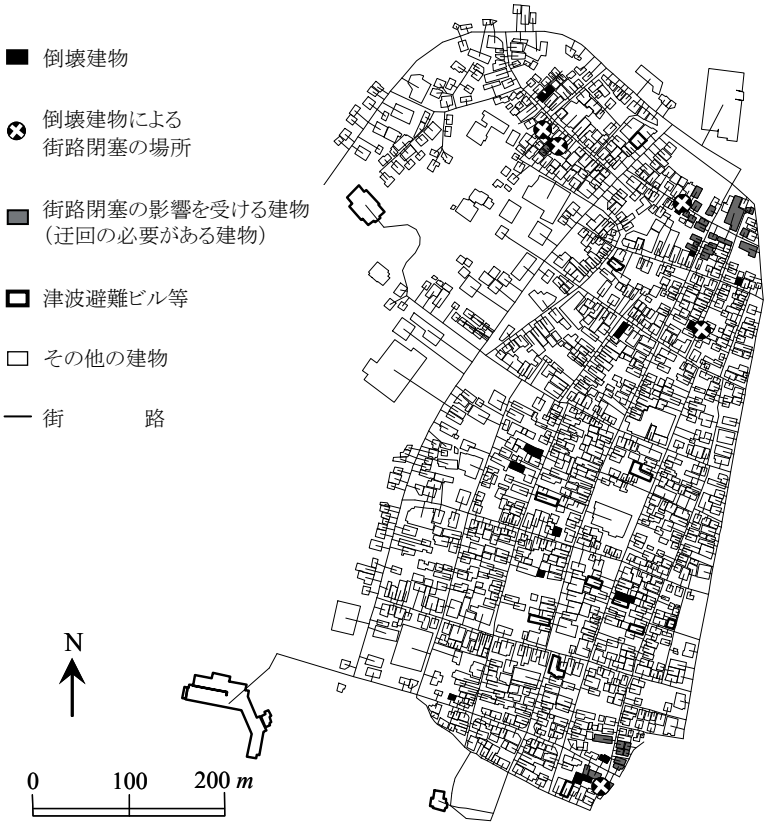
No.11

No.12（右側）

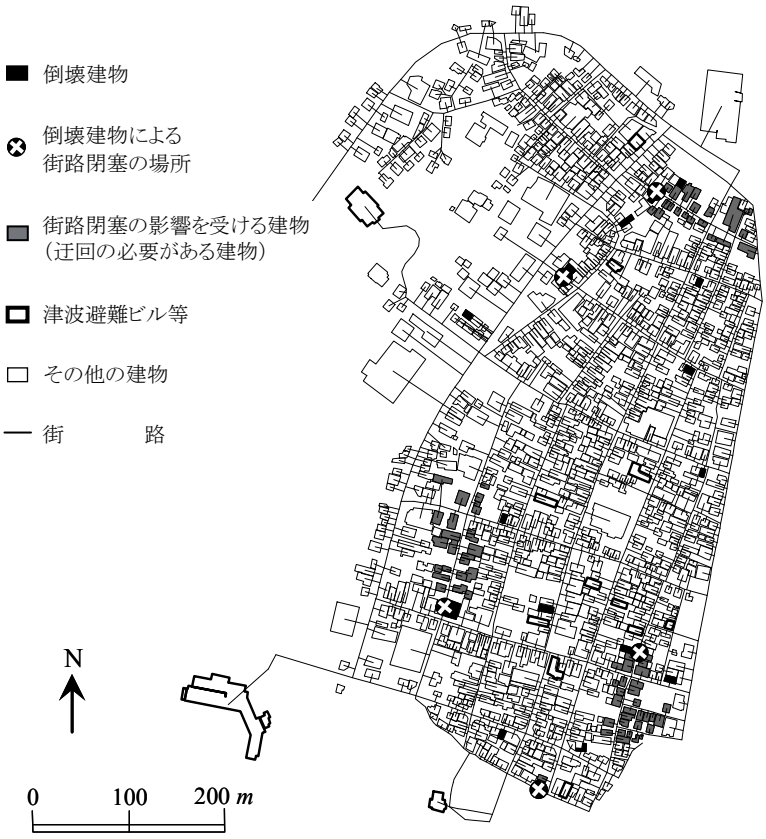
付録-2　津波避難の安全性のケーススタディの結果



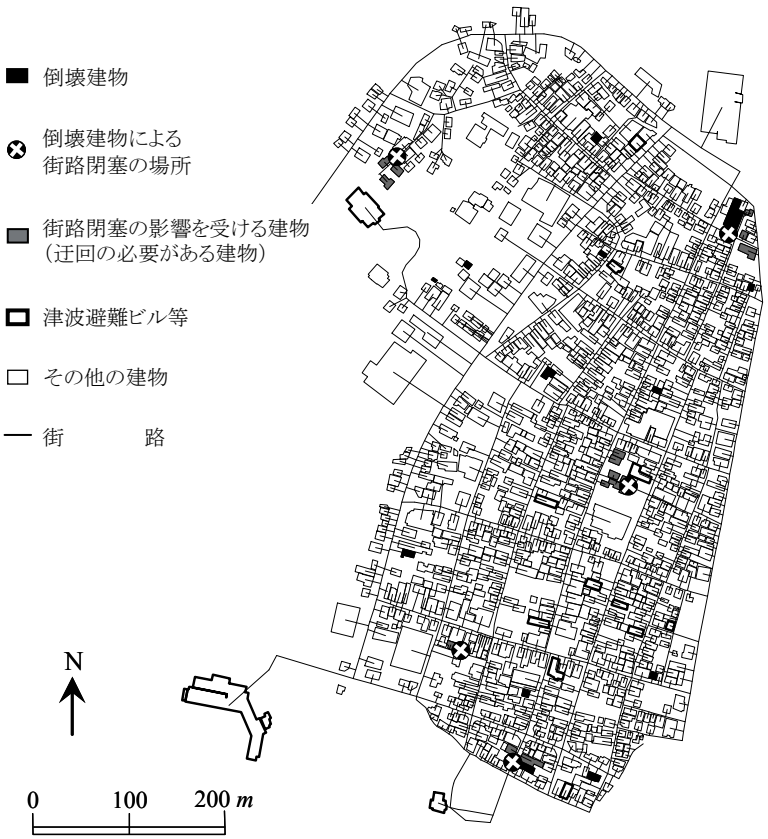
付録図-2.1　ケーススタディの結果（ケース No.1）



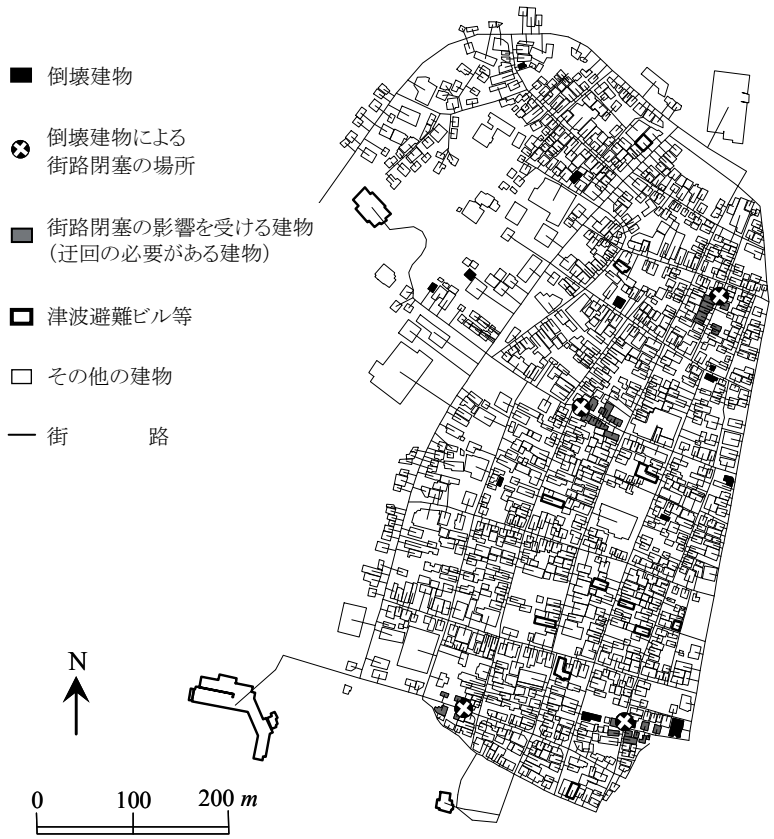
付録図-2.2　ケーススタディの結果（ケース No.2）



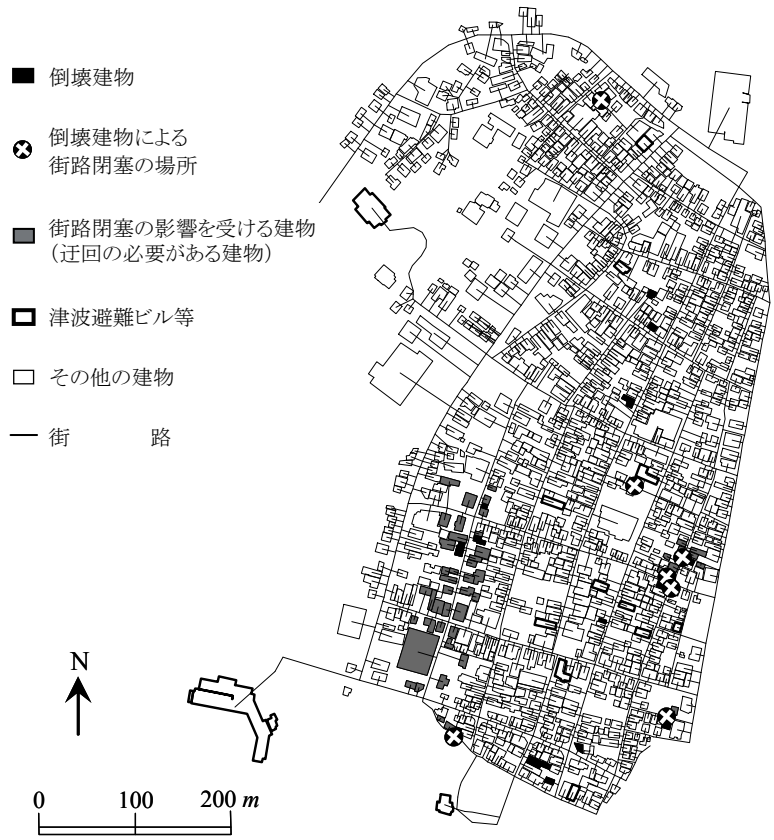
付録図-2.3　ケーススタディの結果（ケース No.3）



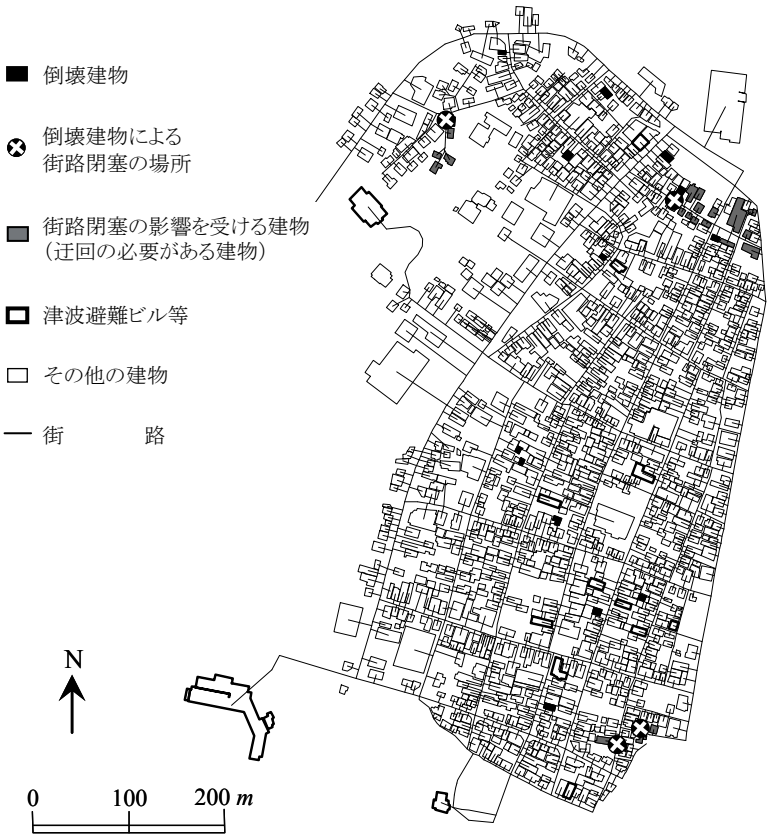
付録図-2.4　ケーススタディの結果（ケース No.4）



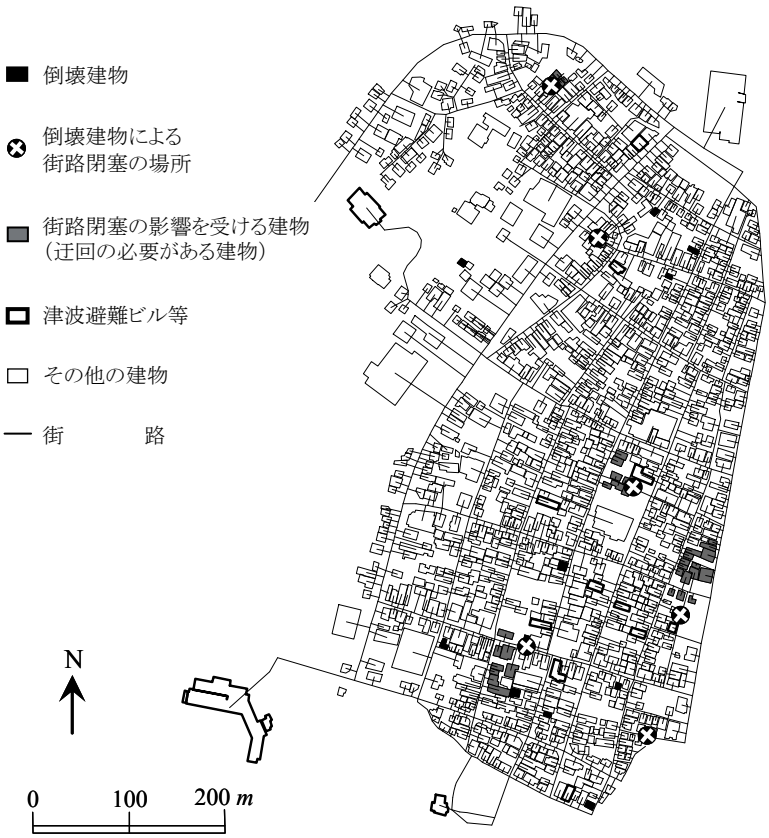
付録図-2.5　ケーススタディの結果（ケース No.5）



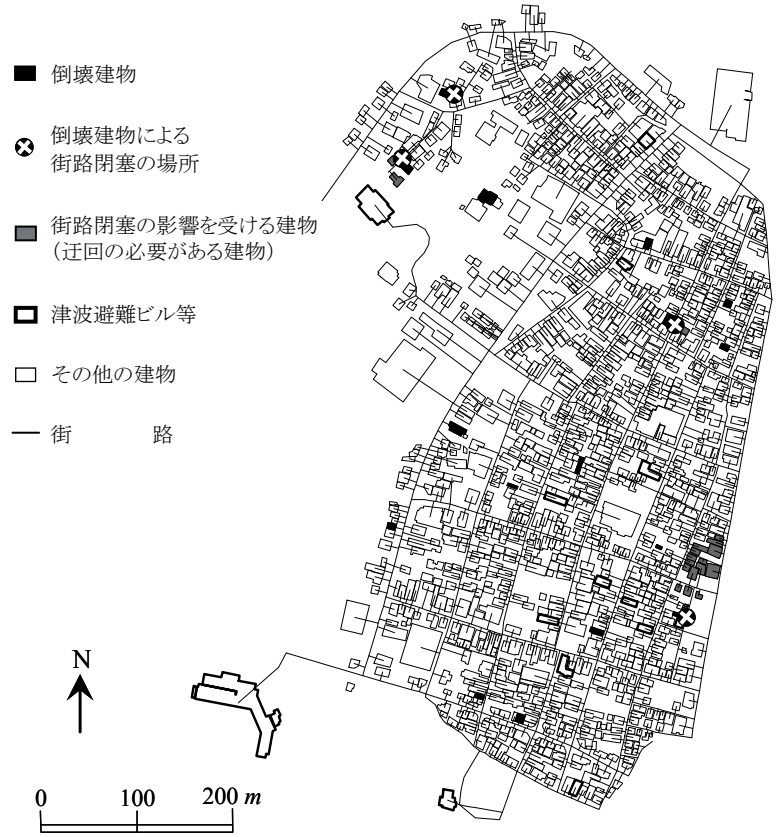
付録図-2.6　ケーススタディの結果（ケース No.6）



付録図-2.7　ケーススタディの結果（ケース No.7）

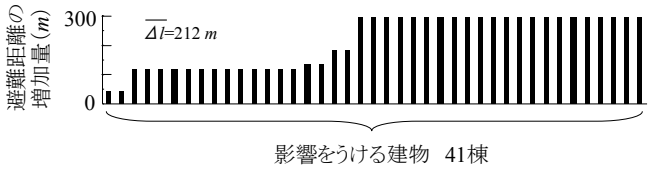


付録図-2.8　ケーススタディの結果（ケース No.8）

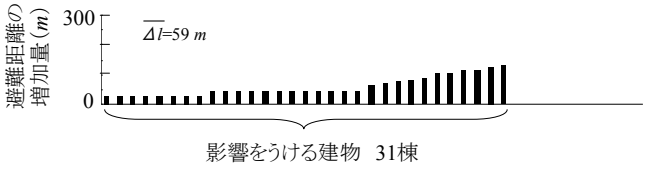


付録図-2.9　ケーススタディの結果（ケース No.9）

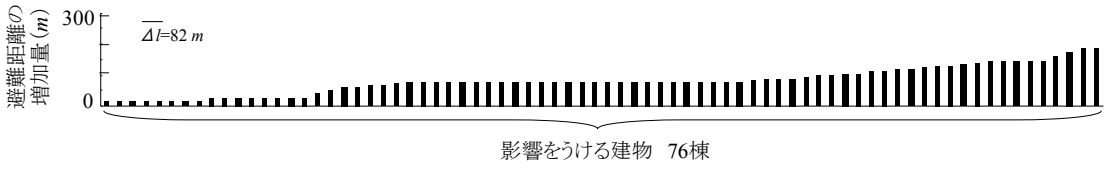
付録図-2.10　ケーススタディの結果（ケース No.10）



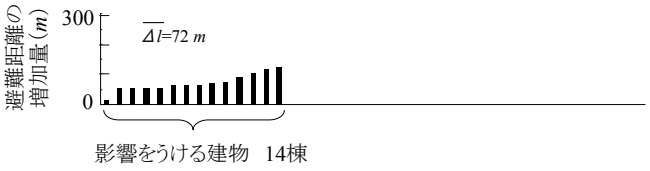
(1) ケース No.1



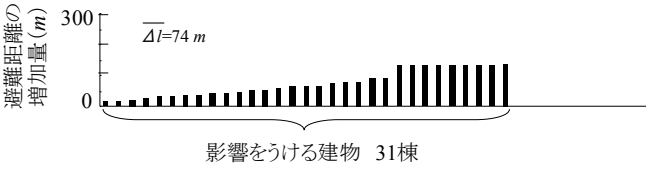
(2) ケース No.2



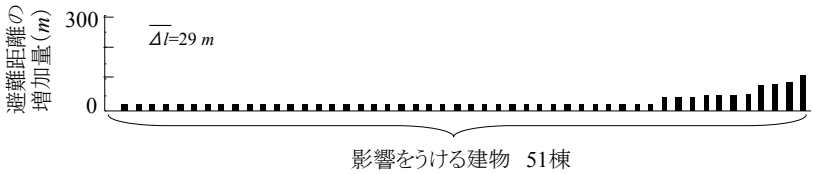
(3) ケース No.3



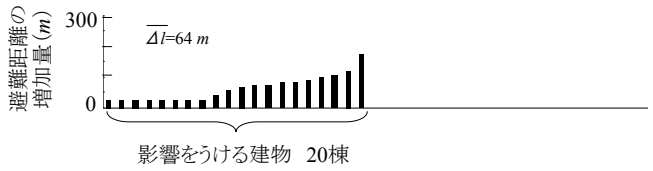
(4) ケース No.4



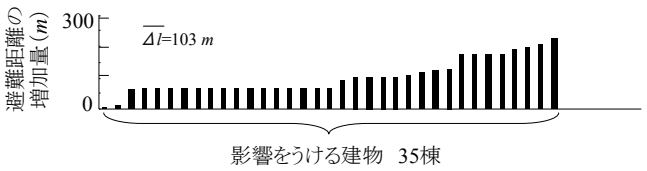
(5) ケース No.5



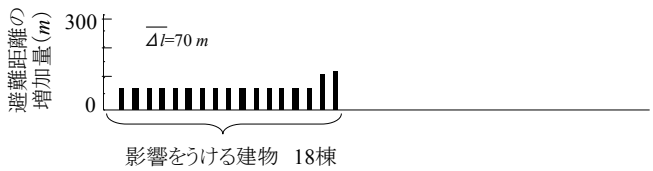
(6) ケース No.6



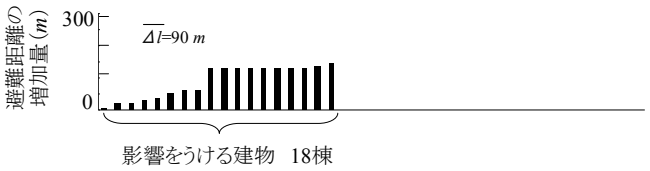
(7) ケース No.7



(8) ケース No.8



(9) ケース No.9



(10) ケース No.10

付録図-2.11 街路閉塞の影響を受ける建物それぞれの避難距離の増加量

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of ＮＩＬＩＭ

No. 537　　October 2009

編集・発行　©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課　　電話:046-844-5019